

ВОЗМОЖНОСТИ ФОРСИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛЕНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ВИХРЕВЫХ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИН ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГТД

Горелов Ю.Г., Копылов И.С., Казуров В.Ф.
ОАО СНТК им. Н. Д. Кузнецова, г. Самара

Необходимость развития газотурбинных двигателей по пути улучшения их удельных характеристик требует значительных усилий по повышению эффективности охлаждения рабочих лопаток турбин в условиях роста напряженности цикла, уменьшения размерности проточной части, увеличения теплоперепадов.

С форсированием параметров цикла (T_g , p_k) постоянно увеличивается неравномерность охлаждения профиля охлаждаемых лопаток турбин, в частности вихревых рабочих лопаток, широко применяемых в АГТД и ГТУ для газоперекачивающих станций и промышленной энергетики.

В традициях ОАО СНТК им. Н.Д. Кузнецова - применение высокоэффективных способов конвективного охлаждения: «вихревого» и «смерчевого». Пленочное охлаждение до сих пор практически отсутствовало на рабочих лопатках, перфорация входной кромки обеспечивала лишь дополнительное проникающее охлаждение цилиндрического участка, а эффективность собственно пелены на профильной части была невелика. В результате средняя эффективность охлаждения при одинаковом суммарном расходе воздуха практически одинакова для лопатки с перфорированной кромкой и без перфорации. Однако, как показали предварительные расчетные исследования, при форсировании цикла до $T_g = 1700\text{K}$ необходимы дополнительные ряды перфорации для защиты корытной оболочки лопатки и снижения неравномерности охлаждения профиля лопатки.

В работе представлены результаты экспериментального исследования высокоэффективных способов пленочного охлаждения вихревых лопаток диагональной схемы охлаждения, обладающих таким важным качеством, как возможность управления локальным теплосъемом и локальной плотностью потока охлаждающего воздуха в широком диапазоне их изменения.

Исследования эффективности охлаждения рабочих лопаток турбины ВД выполнялось на рабочих лопатках с двумя рядами перфорации на входной кромке (исходный вариант) и с дополнительными рядами пленочной завесы на корытце и спинке на однокаскадном и полноразмерном газогенераторах НК-93. Рабочие лопатки устанавливались в одно

рабочее колесо, термометрирование тела рабочих лопаток проводилось индикаторами максимальной температуры кристаллическими (ИМТК) на максимальном за время испытания режиме (для полноразмерного газогенератора НК-93 - при $T_{\Gamma} \cong 1600\text{K}$). Исследование эффективности охлаждения лопаток проводилось также в модельных условиях на «пакетном» стенде, использующем пакет неподвижных рабочих лопаток, обдуваемых газом, с одновременной подачей охлаждающего воздуха и газа, с имитацией температурного фактора при варьировании в широком диапазоне режимными факторами: перепадом охладителя на лопатках и расходом охлаждающего воздуха - $G_{\text{охл}}$.

Для оценки потенциальных возможностей расположения отверстий перфорации на корытной и спинной оболочках лопаток, исключающих затекание газа через отверстия перфорации на эксплуатационных режимах НК-93, проводилась расчетная оценка возможных границ затекания газа вдоль профиля X вихревых рабочих лопаток турбины ВД (рис.1, 2). С этой целью была составлена гидравлическая схема течения охладителя в виде графов и, применяя методику и программу, разработанную Слитенко А.Ф. (Харьковский политехнический институт), проведены расчетные исследования распределения давлений и расходов охлаждающего воздуха в вихревых каналах по всей высоте рабочих лопаток. Результаты проведенных исследований распределения по профилю относительных давлений охлаждающего воздуха $\bar{P}_{\text{охл}} = P_{\text{охл. в. i}} / P_K$ сравнивались с имеющимся в трех сечениях по высоте лопаток распределением относительного давления газа $\bar{P}_{\Gamma} = P_{\Gamma \text{ в. i}} / P_K$. В результате сравнения было установлено, что на спинке лопатки имеется вполне приемлемый запас по перепаду давлений $\Delta \bar{P}_i = \bar{P}_{\text{охл}i} - \bar{P}_{\Gamma i}$ в трех сечениях по высоте лопатки $h_L = 9\%; 54\%; 75\%$, а на корытце - в нижнем и среднем сечениях в районе выходной матрицы относительное давление газа превышает давление воздуха $\bar{P}_{\text{охл}}$, особенно заметно это превышение в среднем сечении лопатки $h_L = 54\%$ (рис.2), где оно составляет на максимальном взлетном режиме $\Delta \bar{P}_i \sim 0,02$.

В связи с этим составленная программа исследования пленочного охлаждения вихревых рабочих лопаток включала варианты охлаждения, в которых ряды отверстий перфорации выполнялись на максимальном удалении от входной кромки для обеспечения минимальных профильных потерь, исключающих, однако протяженность выходной вихревой матрицы, где $\bar{P}_{\Gamma} > \bar{P}_{\text{охл}}$. Для тепловой защиты наиболее нагрет-

тых локальных участков рабочих лопаток турбины ВД на исследуемых лопатках электроэрозионным способом выполнялась перфорация на корытце и спинке: для ряда лопаток - из центральной вихревой матрицы, для других лопаток - из гладкого канала между центральной и выходной вихревыми матрицами (рис.1).

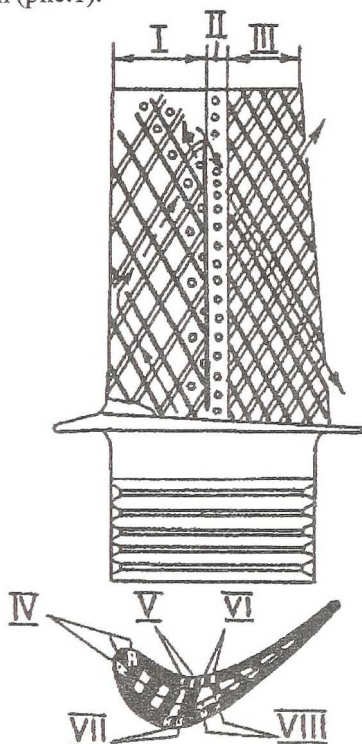


Рисунок.1- Схема «вихревой» рабочей лопатки турбины ВД с дополнительными рядами перфорации на спинке и корытце.

I - центральная вихревая матрица; II- гладкий канал; III - выходная матрица; IV - перфорация на входной кромке; V - перфорация из центральной матрицы со стороны корытца; VI - перфорация из гладкого канала со стороны корытца; VII - перфорация из центральной матрицы со стороны спинки; VIII - перфорация со стороны спинки из гладкого канала.

Представленная программа исследований включала следующие варианты охлаждения экспериментальных рабочих лопаток турбины ВД (рис.1):

- исходный способ (штатное исполнение) - с перфорационными отверстиями только на входной кромке (использовались три рабочие лопатки),

и дополнительно к исходному способу - следующие варианты охлаждения пера лопаток, (исследуемый каждый на двух рабочих лопатках):

- второй вариант - с дополнительной перфорацией корытца (16 отверстий $\varnothing 0,5^{+0,1}$) из передней вихревой матрицы;
- третий вариант - с дополнительной перфорацией корытца (19 отв. $\varnothing 0,5^{+0,1}$) из гладкого канала между вихревыми матрицами;
- четвертый вариант - с дополнительной перфорацией спинки (16 отв. $\varnothing 0,4^{+0,1}$) из передней матрицы;
- пятый вариант - с дополнительной перфорацией спинки (18 отв. $\varnothing 0,4^{+0,1}$) из гладкого канала;
- шестой вариант - с запаянными перфорационными отверстиями на входной кромке (вариант только конвективного охлаждения).

Рабочие лопатки турбины ВД препарировались датчиками ИМТК в трех сечениях по высоте лопатки, девятью датчиками в каждом сечении.

Для определения дополнительных затрат охладителя за счет перфорации на спинной и корытной оболочках лопаток, проводились их изотермические продувки до и после электроэрозионного прожига отверстий перфорации.

По результатам экспериментальных изотермических продувок установлено, что введение дополнительной перфорации корытца из вихревой матрицы приводит к увеличению расхода охлаждающего воздуха по сравнению с исходным способом охлаждения (штатный вариант лопатки) на $\Delta G_{перф.кор.}^{ц.в.м.} = 0,3 \dots 0,4\%$, перфорация из гладкого канала - на

$\Delta G_{перф.кан.}^{гл.кан.} = 0,3 \dots 0,35\%$, что в свою очередь ведет к снижению средней по поверхности температуры рабочих лопаток по сравнению с исходным вариантом их охлаждения на максимальном взлетном режиме: в сечении $h_l=90\%$ - на $18^\circ - 33^\circ$; в сечении $h_l=54\%$ - на $14^\circ - 20^\circ$; в сечении $h_l=19\%$ - на $10^\circ - 25^\circ$

Результаты изотермических продувок показали, что дополнительная перфорация спинки рабочих лопаток из вихревой матрицы увеличивает расход охлаждающего воздуха на $\Delta G_{перф.сп.}^{ц.в.м.} = 0,3 \dots 0,35\%$, пер-

форация из гладкого канала - на $\Delta G_{перф.кан.}^{гл.кан.} = 0,35 \dots 0,4\%$, что приводит к снижению на взлетном режиме средней температуры лопаток по сравнению со штатным вариантом: в сечении $h_l=90\%$ на $2^\circ - 17^\circ$; в сечении $h_l=54\%$ - на $3^\circ - 25^\circ$; в сечении $h_l=19\%$ - на $0^\circ - 23^\circ$.

Осредненная по сечению температура рабочих лопаток без перфорации входных кромок (только с конвективным охлаждением) ($\Delta G_{\text{лоп.}}^{б/н} = 2,32 - 2,35\%$) по сравнению со штатными лопатками (с перфорацией входной кромки $G_{\text{в л. шт}} = 4,0\%$) выше: в сечении $h_l = 90\%$ - на $46^\circ - 61^\circ$; в сечении $h_l = 54\%$ - на $70^\circ - 107^\circ$; в сечении $h_l = 19\%$ - на $31^\circ - 66^\circ$.

На основании измеренных температур рабочих лопаток турбины ВД, температур греющей $T_{ГВ}^*$ и охлаждающей ($T_{\text{охл}}$) сред определялась эффективность охлаждения поверхности лопаток Θ в трех сечениях по их высоте.

Результаты экспериментальных исследований эффективности охлаждения сравнивались для различных вариантов пленочной завесы вихревых лопаток как при постоянном перепаде на них, реализуемом в натурных условиях рабочих лопаток НК-93, НК-321, так и при постоянном расходе охлаждающего воздуха.

Экспериментальные исследования в натурных и модельных условиях показали, что при постоянном перепаде на лопатках ($\pi = P_{\text{охл}} / P_{\text{гв}}^*$), введение дополнительной перфорации корытца из гладкого канала между вихревыми матрицами позволяет повысить среднюю по поверхности эффективность охлаждения для трех сечений по высоте лопаток $h_l = 19\%$, 54% , 90% - на $0,018 - 0,028$, что соответствует снижению средней температуры лопатки на взлетном режиме - на $12^\circ - 20^\circ$ при увеличении расхода воздуха через лопатку на $0,3 - 0,35\%$.

Дополнительная перфорация спинки из передней вихревой матрицы приводит к увеличению средней по поверхности эффективности охлаждения в трех сечениях по высоте лопаток $h_l = 19\%$, 54% , 90% - на $0,017 - 0,018$, что соответствует снижению средней температуры лопатки на $12^\circ - 13^\circ$ при увеличении расхода воздуха на $0,3\%$.

По результатам опытных исследований установлено, что при применении рабочих лопаток турбины ВД только с конвективным вихревым охлаждением (без перфорации входной кромки) средняя по поверхности сечения эффективность охлаждения таких лопаток ниже, чем эффективность охлаждения исходных лопаток с перфорацией входной кромки:

- в сечении $h_l = 54\%$ - на $\Delta\Theta = 0,11 - 0,155$ (температура - выше на $\Delta t_{\text{дл}} = -78 - 110^\circ$);
- в сечении $h_l = 90\%$ - на $\Delta\Theta = 0,082 - 0,108$ (температура - выше на $\Delta t_{\text{дл}} = -46 - 61^\circ$);

- в сечении $h_L=19\%$ - на $\Delta\Theta = 0,069 - 0,11$ (температура - выше на $\Delta t_L = -48 - 76^\circ$)

при экономии расхода охлаждающего воздуха на пленочную завесу входной кромки - $\Delta G = -1,65\%$. Очевидно, что такая экономия охлаждающего воздуха не приемлема, т.к. приводит к чрезмерным перегревам (до 110°C), на наиболее термонапряженном участке лопатки - входной кромке, а как показали ранее проведенные сравнительные исследования в составе натурных турбин - к образованию трещин и прогаров на входной кромке.

Проведенные эксперименты показали, что введение дополнительной перфорации корытца из передней вихревой матрицы дает максимальный прирост средней по поверхности сечения эффективности охлаждения $\Delta\theta$ - на $0,019 - 0,046$ для трех сечений по высоте лопаток $h_L=19\%, 54\%, 90\%$, при увеличении расхода воздуха по сравнению с исходным способом охлаждения на $\Delta G_B=0,3 - 0,4\%$. Это равносильно снижению температуры лопатки на максимальном взлетном режиме - на $13^\circ - 26^\circ$.

При реализованной в вихревых лопатках НК-93 схеме течения охладителя (рис.2) и радиальной эпюре температуры газа перед рабочим колесом, в районе верхнего сечения лопатки ($h_L=90\%$) сосредоточены наибольшие температура газа, а хладоресурс охлаждающего воздуха наиболее низок.

Поэтому наиболее актуальным является снижение температуры тела лопатки за счет введения дополнительной пленочной завесы именно в периферийной ее области. Как показали проведенные эксперименты, введение такой завесы на корытце из передней вихревой матрицы приводит к максимальному увеличению средней по поверхности эффективности охлаждения именно в верхнем сечении лопатки на $\Delta\theta = 0,046$.

Таким образом, в результате проведенных сравнительных исследований было установлено, что максимальное увеличение средней по поверхности эффективности охлаждения вихревой рабочей лопатки по сравнению с исходным способом охлаждения получено для варианта с дополнительной перфорацией корытца из передней вихревой матрицы - на $\Delta\Theta = 0,019 - 0,046$, минимальное - для варианта с перфорацией из гладкого канала на спинке - на $\Delta\Theta = 0,008 \dots 0,03$.

Распределение локальных эффективностей охлаждения по поверхности профилей лопаток ТВД в сечении $h_L=54\%$ показаны на рис.3.

Минимальный прирост эффективности охлаждения получен для варианта с перфорацией спинки из гладкого канала, в котором дополнительная пленочная завеса приводит к росту эффективности охлаждения:

- по сравнению с исходным вариантом с перфорацией на входной кромке - на корытце на $\Delta\Theta = 0,065 \dots 0,02$ на расстоянии 5 ... 18 мм от входной кромки (далее по профилю эффективность охлаждения по корытцу практически одинакова) и на спинке - на $\Delta\Theta = 0,065 \dots 0,045$ на расстоянии 5 ... 25 мм от входной кромки (далее по спинке к выходной кромке $\Delta\Theta$ убывает до $\Delta\Theta = 0,02$);

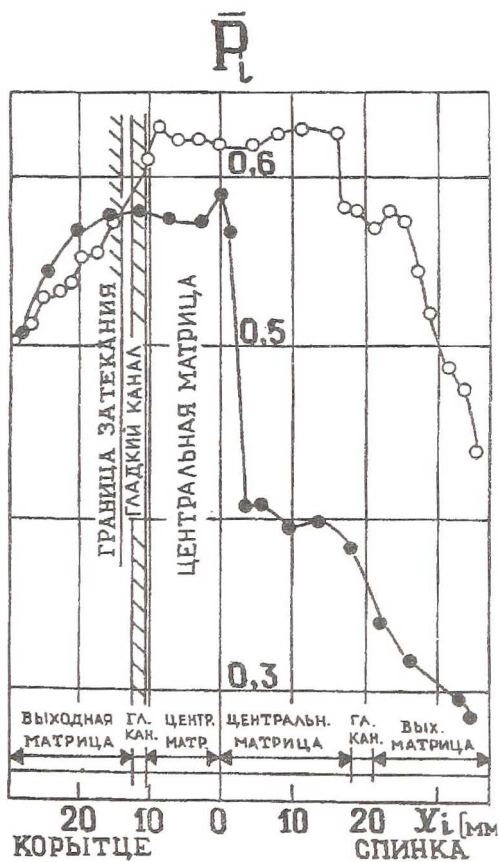


Рисунок 2- Распределение относительного давления газа и охлаждающего воздуха по профилю рабочей лопатки турбины ВД НК-93 в среднем сечении на максимальном взлетном режиме.

$$1 - P_{ГВ}^* / P_K ; 2 - P_{ОХЛ} / P_K$$

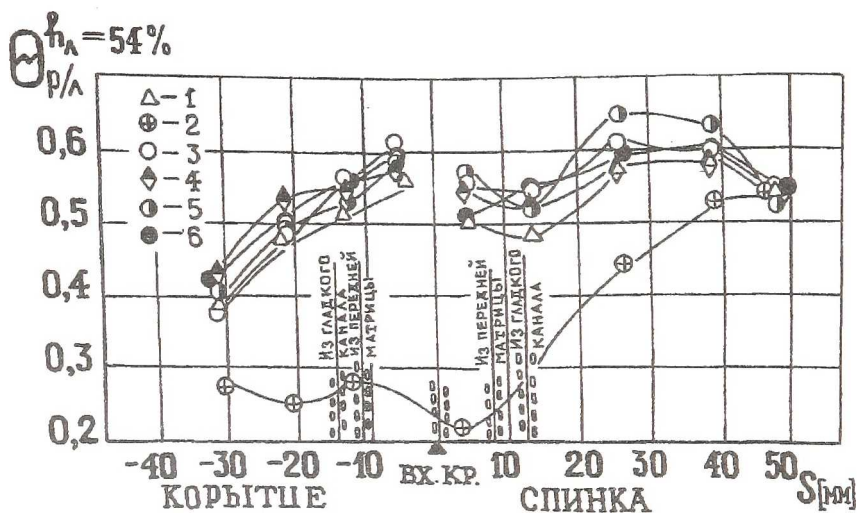


Рисунок 3- Распределение эффективности охлаждения по поверхности рабочих лопаток ТВД в сечении $h_L = 54\%$.

1 - с перфорацией входной кромки (штатный вариант); 2 - без перфорации по профилю. С перфорацией входной кромки и дополнительно: 3 - с перфорацией спинки из гладкого канала; 4 - с перфорацией корытца из гладкого канала; 5 - с перфорацией спинки из передней вихревой матрицы; 6 - с перфорацией корытца из передней вихревой матрицы.

- по сравнению с вариантом без перфорации по профилю лопаток - на корытце $\Delta\Theta = 0,35 \dots 0,1$ на расстоянии 5 ... 30 мм от входной кромки, на спинке - на $\Delta\Theta = 0,335 \dots 0,04$ на расстоянии 5 ... 44мм от входной кромки (непосредственно у окон выходной кромки на спинке $\Delta\Theta \cong 0$).

Максимальный прирост эффективности охлаждения в области среднего сечения h_L , % получен для варианта с перфорацией корытца из вихревой матрицы, в котором дополнительная пленочная завеса приводит к росту эффективности охлаждения:

- по сравнению с исходным вариантом с перфорацией на входной кромке - на корытце - на $\Delta\Theta = 0,055 \dots 0,04$ на расстоянии 5 ... 31 мм от входной кромки, на спинке - на $\Delta\Theta = 0,07 \dots 0,03$ на расстоянии 10 ... 45 мм от входной кромки;
- по сравнению с вариантом без перфорации по профилю лопаток - на корытце на $\Delta\Theta = 0,29 \dots 0,17$ на расстоянии 10 ... 30 мм от входной кромки, на спинке - на $\Delta\Theta = 0,29 \dots 0,08$ на расстоянии 8 ... 40 мм от

входной кромки (непосредственно у окон выходной кромки на спинке $\Delta\Theta \cong 0$).

В результате исследования распределения эффективности охлаждения поверхности вихревых рабочих лопаток вдоль их профиля, установлено, что введение дополнительной перфорации в таких лопатках на наиболее нагретой корытной оболочке позволяет достичь требуемых локальных эффективностей охлаждения рабочих лопаток турбины ВД. Это даст возможность существенно снизить неравномерность охлаждения профиля и исключить «переразмеривание» площади каналов системы охлаждения для удовлетворения требований по жаростойкости поверхности.

Исследование средней по поверхности эффективности охлаждения вихревых рабочих лопаток с различными вариантами пленочной завесы позволило установить, что наибольшие эффективности охлаждения получены для варианта с заградительным охлаждением, подаваемым из центральной вихревой матрицы на корытце лопатки. Так, средние по поверхности эффективности охлаждения рабочих лопаток турбины ВД в районе среднего сечения лопатки - $h_L = 54\%$ при реализуемом в натуральных условиях перепаде на лопатках ($\pi = P_{\text{охл}} / P_{\text{гв}}^*$) составляют: для исходного варианта - лопатки с перфорацией входной кромки - $\theta = 0,513$, а для вариантов с дополнительной перфорацией: с перфорацией корытца из передней вихревой матрицы - $\theta = 0,542$; с перфорацией корытца из гладкого канала - $\theta = 0,535$; с перфорацией спинки из передней матрицы - $\theta = 0,530$; с перфорацией спинки из гладкого канала - $\theta = 0,543$, а для рабочей лопатки без перфорации входной кромки - $\theta = 0,402$.

В результате сравнительного исследования установлено, что при постоянной температуре поверхности вихревых рабочих лопаток увеличение эффективности охлаждения за счет дополнительной перфорации лопаток на корытце и спинке позволит увеличить среднемассовую температуру газа перед турбиной $T_{\text{Г}}$ в среднем на 36° .

Таким образом, в результате исследований эффективности пленочной завесы вихревых рабочих лопаток впервые определены возможности форсирования суммарной комбинированной эффективности охлаждения лопаток в условиях форсирования цикла по $T_{\text{Г}}$ до $T_{\text{Г}} = 1700 \dots 1750\text{K}$ за счет введения дополнительной завесы на корытной и спинной оболочках, показана возможность исключить «переразмеривание» системы охлаждения по расходу воздуха, связанное с необходимостью охлаждать наиболее нагретые участки лопатки сосредоточенные на корытной и спинной оболочках, в местах перехода от входной вихревой матрицы к выходной.